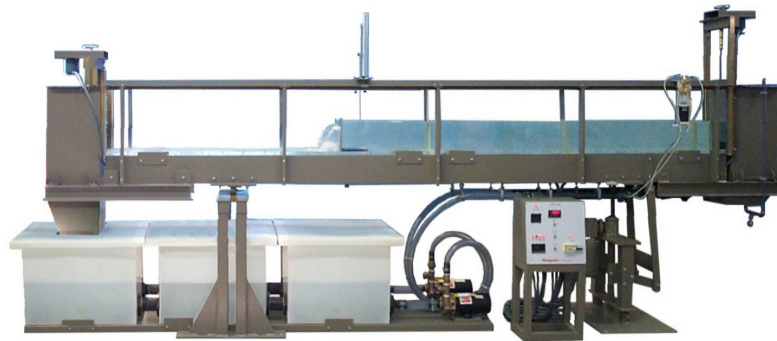


Metody doświadczalne w hydraulice

Ćwiczenia laboratoryjne:

⇒ *pomiary parametrów przepływu w kanałach otwartych*



dr inż. Ireneusz Dyka – pok. 3.34 H4/102 H10

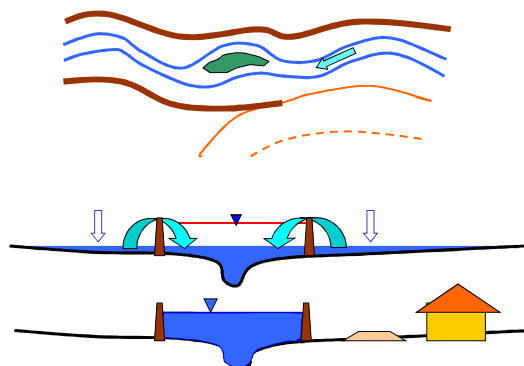
<http://pracownicy.uwm.edu.pl/i.dyka>

Modelowanie budowli hydrotechnicznych





Przepływ w korytach otwartych



kanal otwarty → przepływ ze swobodną powierzchnią

Przepływ w korytach otwartych

Przewody otwarte dzielimy na:

- **Naturalne**

rzeki

strumienie

potoki

- **Sztuczne**

kanały komunikacyjne

kanały melioracyjne

sztolnie

Koryto naturalne → przepływ ze swobodną powierzchnią

PODSTAWOWE POJĘCIA

Przewody otwarte dzielimy na

- *naturalne (rzeki, strumienie, potoki)*
- *sztuczne (kanały komunikacyjne, melioracyjne itp.).*



Łóżysko - przewód otwarty, którego dno i ściany boczne są lub mogą być zwilżone płynącą cieczą.

Przekrój przepływowy - część przekroju poprzecznego przewodu przez którą przepływa ciecz. (tzn. przekroju prostopadłego do linii środkowej),

Promień hydrauliczny R_h określamy następująco

$$R_h = \frac{A}{U}$$

gdzie:

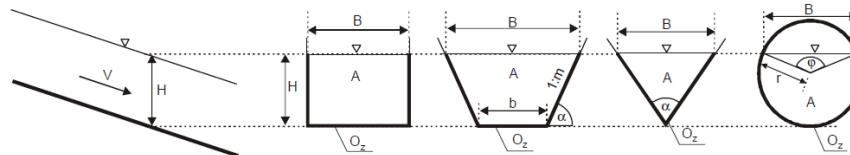
A – pole powierzchni przekroju przepływowego,

U – obwód zwilżony, tj. długość krzywej przecięcia przekroju poprzecznego ze ścianami zwilżonymi łóżyska.

kanal otwarty → przepływ ze swobodną powierzchnią

Parametry kanału

H – głębokość, B – szerokość strumienia na poziomie zwierciadła wody,
 A – pole przekroju czynnego, O_z – obwód zwilżony, i – spadek dna kanału,
 R – promień hydrauliczny, $R = \frac{A}{O_z}$



Powierzchnia przekroju A	BH	$(b + mH)H$	mH^2	$\frac{r^2}{2} \left(\frac{\pi\varphi}{180^\circ} - \sin\varphi \right)$
Obwód zwilżony O_z	$B + 2H$	$b + 2H\sqrt{1+m^2}$	$2H\sqrt{1+m^2}$	$\frac{\pi r\varphi}{180^\circ}$
Szerokość zwierciadła	B	$b + 2mH$	$2mH$	$2r \sin \frac{\varphi}{180^\circ}$

$$m = \operatorname{ctg} \alpha$$

kanal otwarty → przepływ ze swobodną powierzchnią

WYMIAROWANIE KANAŁU

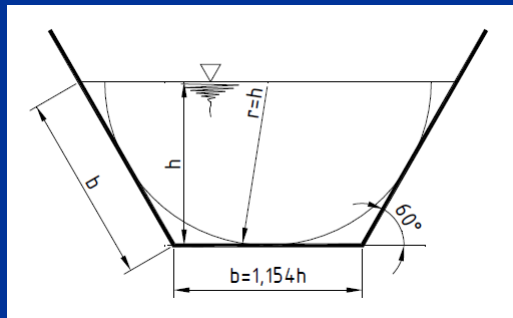
Właściwe wymiarowanie hydrauliczne kanału przy określonym przepływie Q powinno zmierzać do:

- możliwie małego zajęcia terenu (koszt wykupu),
- możliwie małej głębokości (koszt wykonawstwa),
- możliwie małego przekroju (koszt ogólny),
- możliwie małego obwodu zwilżonego (koszt okładziny),
- właściwego doboru prędkości wody (górną granicę określa niszczenie okładziny, dolną - powstawanie osadów w dnie).

Najkorzystniejszym hydraulicznie przekrojem jest przekrój półkolisty, ponieważ dla danej powierzchni przekroju poprzecznego A oraz spadku I otrzymujemy maksymalne natężenie przepływu wody w kanale Q (dla zadanego pola obwód zwilżony jest najmniejszy, a promień hydrauliczny największy).

Kanał otwarty, trapezowy

Obliczenie kanału sprowadza się do znalezienia minimalnego przekroju, wystarczającego do zapewnienia żadanego przepływu przy spełnieniu przyjętych warunków odnośnie szorstkości ścian kanału i nachylenia skarp.



Przekrój hydraulicznie najkorzystniejszy o kształcie trapezowym – ze względu na stromość skarp (nachylenie do poziomu pod kątem 60 st.) nie może być stosowany w korytach gruntowych, a więc ma ograniczone zastosowanie w budowie kanałów!

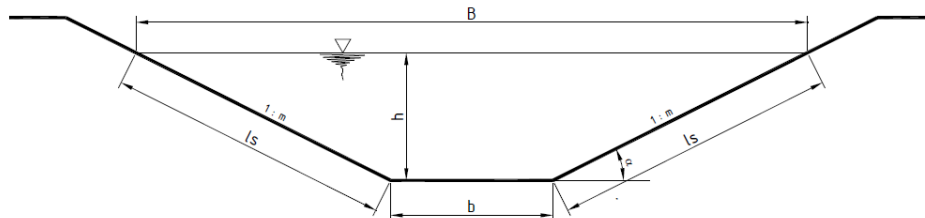
Kanał otwarty, trapezowy

Do stosowania w praktyce przydatne mogą być przekroje hydraulicznie najkorzystniejsze przy zadanych nachyleniach skarp, dla których współczynnik $\beta = \frac{b}{h}$ można obliczyć za pomocą następujących wzorów:

$$\beta = \frac{b}{h} = 2(\sqrt{1+m^2} - m)$$

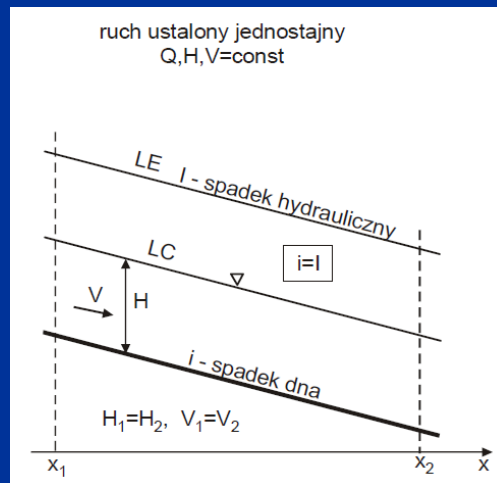
$$\beta = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

w których $m = \operatorname{ctg} \alpha$, α – kąt nachylenia skarpy do poziomu.



$1:m$	$m = \operatorname{ctg} \alpha$	$\beta = \frac{b}{h}$
pionowe	0	2,000
1:1,0	1,0	0,828
1:1,25	1,25	0,702
1:1,5	1,5	0,606
1:2,0	2,0	0,472
1:2,5	2,5	0,385
1:3,0	3,0	0,325
1:3,5	3,5	0,280
1:4,0	4,0	0,246

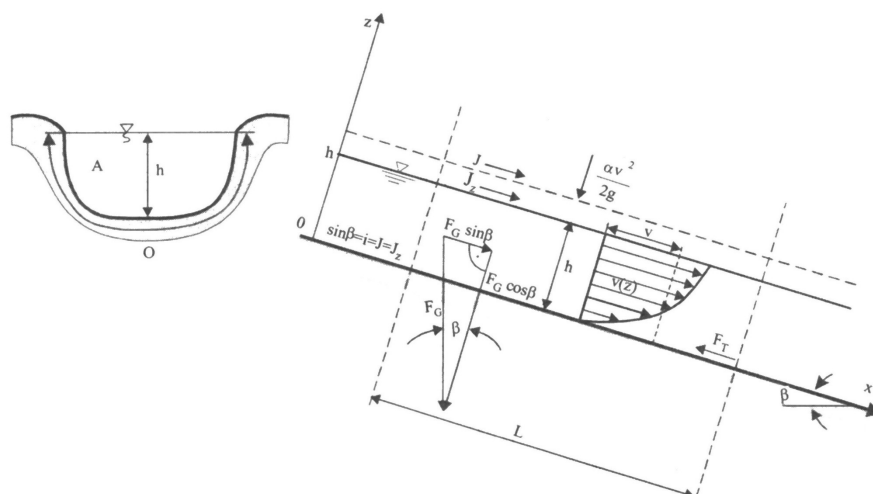
kanal pryzmatyczny → o stałym przekroju → przepływ ustalony, jednostajny



Przepływ normalny – przepływ ustalony jednostajny

Głębokość normalna H_n , prędkość normalna V_n , spadek normalny i_n

Schemat do wyprowadzenia równania jednostajnego ruchu cieczy w korycie



Składowa ciężaru wody w kierunku przepływu

$$F_G \sin \beta = \rho g A L \sin \beta = \rho g A L J$$

ρ - gęstość wody,
 A - pole całego przekroju strumienia,
 g - przyspieszenie ziemskie,
 J - spadek hydrauliczny (spadek linii energii)
w ruchu jednostajnym dla małych wartości β : $\sin \beta \approx \tan \beta = J$

Wartość naprężeń stycznych uśredniona wzdłuż obwodu zwilżonego

$$\tau = \rho g \frac{A}{O} J = \rho g R J$$

R jest promieniem hydraulicznym przekroju poprzecznego koryta wyrażonym zależnością:

$$R = \frac{A}{O}$$

Chezy powiązał naprężenia styczne na obwodzie zwilżonym przekroju koryta ze średnią prędkością przepływu wody w przekroju

$$\tau = \gamma \frac{v^2}{C^2}$$

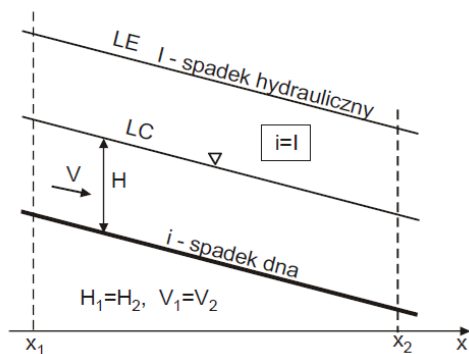
- γ - ciężar objętościowy wody ($\gamma = \rho g$),
- v - średnia prędkość przepływu wody w przekroju,
- C - współczynnik prędkości wprowadzony przez Chezy'ego dla scharakteryzowania oporów przepływu w korycie.

kanal pryzmatyczny → o stałym przekroju → przepływ ustalony, jednostajny

Średnia prędkość przepływu wody w korycie

$$v = c \sqrt{RI}$$

$$v = \frac{Q}{A}$$



- c - współczynnik prędkości wprowadzony przez Chezy'ego dla scharakteryzowania oporów przepływu w korycie;
- Q - natężenie przepływu;
- A - przekrój przepływu.

Przepływ ustalony, jednostajny

Manning i Strickler podali empiryczne zależności do obliczania średniej prędkości przepływu

$$v = k_{st} R^{2/3} I^{1/2}$$

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$$

$$c = k_{st} R^{1/6}$$

$$c = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

k_{st} - współczynnik szorstkości powierzchni dna i ścian koryta wprowadzony przez Stricklera dla scharakteryzowania oporów przepływu w korycie,
 n - współczynnik szorstkości powierzchni dna i ścian koryta wprowadzony przez Manninga dla scharakteryzowania oporów przepływu w korycie.

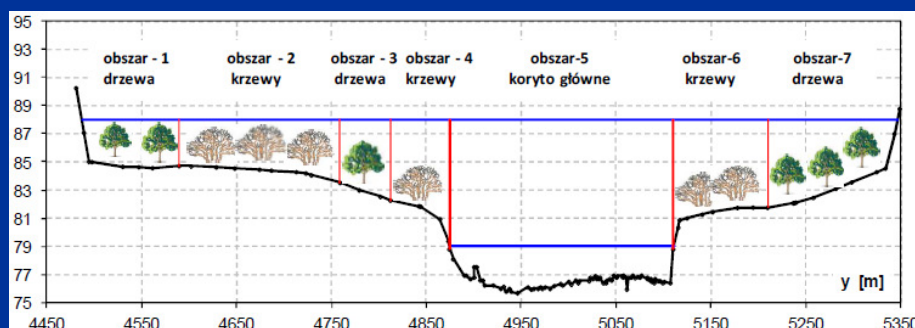
Przepływ ustalony, jednostajny

Współczynnik szorstkości wg Manninga n (źródło: Sawicki, 1998)

Charakterystyka powierzchni	n [m ^{-1/3} s]
Wyglądzone ścianki żelbetowe	0.011
Ścianki z glazurowanej cegły, ścianki ceglane z zaprawą	0.011÷0.015
Gładki beton w kanałach o niedużych krzywiznach, bez osadów na dnie	0.013÷0.015
Kanały betonowe z osadami dennymi, krzywizny łuków o małych promieniach	0.015÷0.018
Nierówny beton, gładka dobrze obrobiona skała	0.017
Ściany z grubego kamienia lub bruku, kanały wyciosane w skałę	0.02÷0.025
Duże kanały ziemne w średnich warunkach, rzeki o bardzo dobrych warunkach przepływu (równe, proste łóżysko, bez zagłębień i roślinności wodnej)	0.025÷0.035
Kanały ziemne źle utrzymane, rzeki o dobrych warunkach przepływu	0.030÷0.035
Kanały i rzeki w złych warunkach (nierówny przekrój, kamienie i rośliny wodne na dnie, brzegach)	0.033÷0.039
Kanały bardzo źle utrzymane, rzeki bardzo złych warunkach przepływu	0.04÷0.045
Strumienie porośnięte roślinnością, o bardzo nieregularnym kształcie	0.07÷0.1

Natężenie przepływu wody w korycie naturalnym

$$Q = \int v_i dA$$

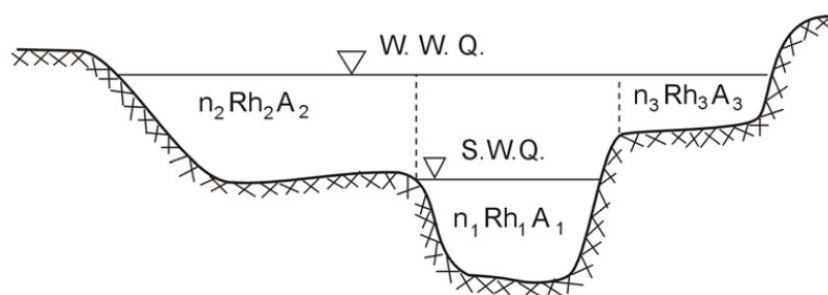


Koryto wielodzielne – traktuje się jako koryto złożone z kilku odrębnych części, dla których wyznaczamy niezależnie prędkość i przepływ.

Uwaga: przy obliczaniu obwodu zwilżonego uwzględniamy jedynie rzeczywistą długość zetknięcia się z korytem (nie uwzględniamy umownych linii podziału).

Natężenie przepływu wody w korycie naturalnym

$$Q = \int v_i dA = I \cdot \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_j} R_j A_j$$



Zmiany współczynnika n w okresie wegetacyjnym na Żuławach

Data pom.	15 III	12 IV	19 IV	15 V	05 VI	29 VI	11 VII	29 VII	22 VIII	05 IX	25 IX	09 X	30 X	24 XI
n	0,030	0,040	0,043	0,053	0,081	0,092	0,108	0,120	0,120	0,079	0,068	0,045	0,040	0,031

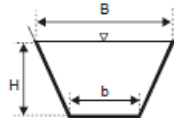
Przepływ ustalony, jednostajny - zadania

1 Obliczyć wydatek wody w półkolistym kanale betonowym. Spadek dna kanału wynosi 8 cm na 1 km.



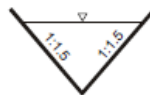
Dane:
 $r = 1 \text{ m}$

2 Obliczyć spadek dna, przy którym kanał trapezowy wykonany z cegły zapewni wydatek $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$.



Dane:
 $b = 1.4 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$,
 $H = 1.2 \text{ m}$, $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

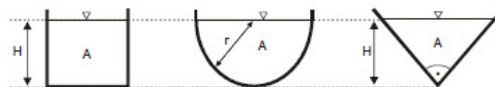
3 Obliczyć głębokość i prędkość krytyczną wody płynącej w korycie o przekroju w kształcie trójkąta równoramiennego i nachyleniu skarp 1:1.5. Jaki musi być spadek kanału o wsp. szorstkości $n = 0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.



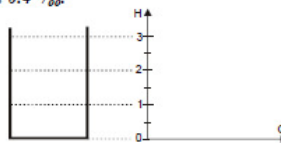
Dane:
 $Q = 9 \text{ m}^3/\text{s}$, $\alpha = 1.1$
 $n = 0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Przepływ ustalony, jednostajny - zadania

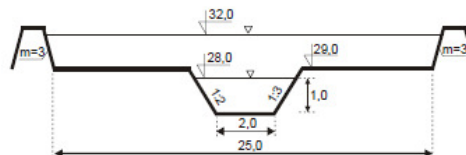
1 Wyznaczyć kształt przekroju hydraulicznie najkorzystniejszego. Pola przekroju A, spadki dna s oraz współczynniki szorstkości n są takie same.



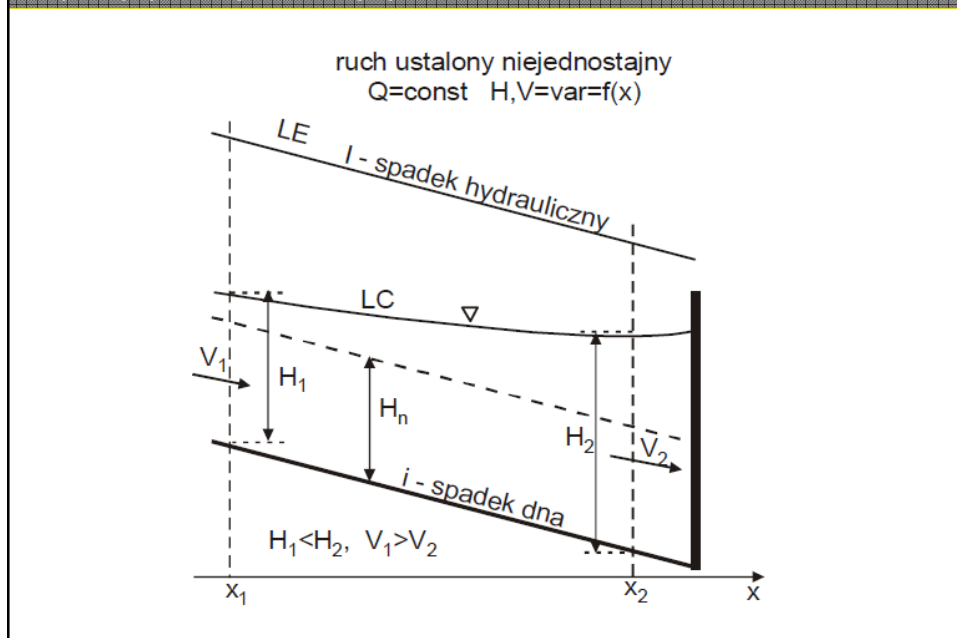
2 Wyznaczyć krzywą natężenia przepływu $Q=f(H)$ dla koryta betonowego prostokątnego o szerokości 1 metra i spadku $0.4^\circ/100^\circ$.



3 Obliczyć wydatek koryta wielodzielnego. Koryto główne pokryte jest kamieniami. Tereny zalewowe pokryte są roślinnością trawiastą. Na odcinku 1 km zwierciadło wody opada o 1 metr.



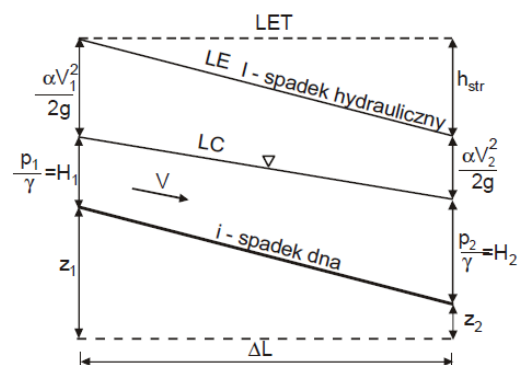
kanal o zmiennym przekroju lub zabudowany →
→ przepływ niejednostajny



kanal o zmiennym przekroju lub zabudowany →
→ przepływ niejednostajny (nierównomierny), ustalony ($Q = \text{const.}$)

Równanie Bernoulliego

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_{str} \quad \text{lub} \quad H_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = H_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \Delta L(I - i)$$



z – wysokość położenia, [m]

$\frac{p}{\gamma}$ – wysokość ciśnienia, [m]

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ – wysokość prędkości, [m]

h_{str} – wysokość strat [m]

$i = \frac{z_1 - z_2}{\Delta L}$ – spadek dna [-]

$I = \frac{h_{str}}{\Delta L}$ – spadek hydrauliczny [-]

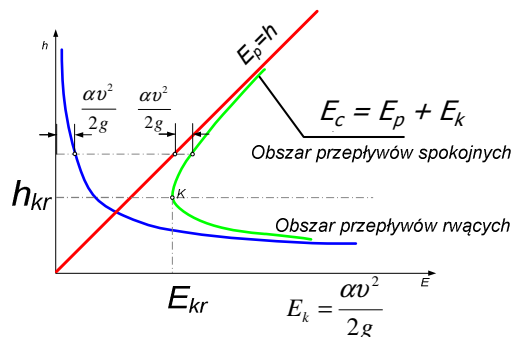
A – pole przekroju czynnego [m²]

Równanie ciągłości

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 = Q$$

ENERGIA W PRZEKROJU PRZEPŁYWOWYM – PRZEPŁYWY SPOKOJNE I RWĄCE

$Q = \text{const.}$ (przepływ ustalony)



$$h \rightarrow 0 \wedge A \rightarrow 0 \Rightarrow E \rightarrow \infty$$

$$h \in (0, \infty) \Rightarrow E \in (0, \infty)$$

$$h \rightarrow \infty \wedge A \rightarrow \infty \Rightarrow E \rightarrow \infty$$

ENERGIA W PRZEKROJU PRZEPŁYWOWYM – PRZEPŁYWY SPOKOJNE I RWĄCE

Energia całkowita przyjmuje wartość minimalną (ekstremum) dla

$$\frac{dE_c}{dh} = \frac{d\left(h + \frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{dh} = \frac{d\left(h + \frac{\alpha Q^2 A^{-2}}{2g}\right)}{dh} = \left(1 - \frac{\alpha Q^2 A^{-3}}{g}\right) \cdot \frac{dA}{dh} = 0$$

$V = \frac{Q}{A}$

Równanie dla przekroju prostokątnego ($A = Bh$)!

$$\frac{dE_c}{dh} = 1 - \frac{\alpha Q^2}{g B^2 h^3} = 1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \cdot \frac{B}{A^3} = 0$$

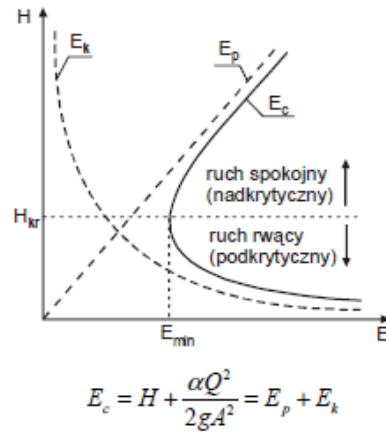
*Z rozwiązania wynika, że istnieje taka **wysokość h_{kr}** ,*

dla której przy stałym strumieniu objętości energia przyjmuje wartość minimalną lub

dla stałej energii strumień objętości osiąga wartość maksymalną

Przepływ ustalony, ruch krytyczny

Ruch krytyczny w kanałach otwartych – ruch w którym przy stałym przepływie Q energia strumienia osiąga wartość minimalną E_{min} (lub przy stałej energii strumienia E przepływ osiąga wartość maksymalną Q_{max})



Równanie ruchu krytycznego

$$\frac{A^3}{B} = \frac{\alpha Q^2}{g}$$

Q – natężenie przepływu, $[m^3/s]$

A – powierzchnia przekroju, $[m^2]$

B – szerokość $[m]$

- ruch nadkrytyczny (spokojny):

$$\frac{A^3}{B} > \frac{\alpha Q^2}{g} \quad \text{lub} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gH_{sr}}} < 1$$

- ruch podkrytyczny (rwący):

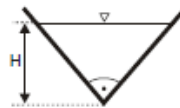
$$\frac{A^3}{B} < \frac{\alpha Q^2}{g} \quad \text{lub} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gH_{sr}}} > 1$$

Fr – liczba Froude'a

H_{sr} – głębokość średnia w przekroju

Przepływ ustalony, ruch krytyczny

4 Sprawdzić jaka forma ruchu burzliwego wody występuje w korycie o przekroju poprzecznym w kształcie trójkąta równoramiennego i nachyleniu skarp 1:1.

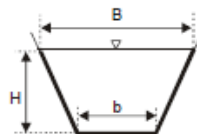


Dane:

$$H = 1.0 \text{ m}$$

$$Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}, \alpha = 1.0$$

5 Obliczyć głębokość i prędkość krytyczną wody płynącej w korycie o przekroju trapezowym. Jaki jest spadek kanału jeśli współczynnik szorstkości wg Manninga wynosi n ?



Dane:

$$b = 4.0 \text{ m}, B = 10 \text{ m}$$

$$Q = 49.5 \text{ m}^3/\text{s}, \alpha = 1.1$$

$$n = 0.025 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$$

Zad. 1. Przepływ ustalony w korycie pryzmatycznym: $Q = \text{const.}$

Dane:

✓ szerokość dna: $b = 8 \text{ m}$

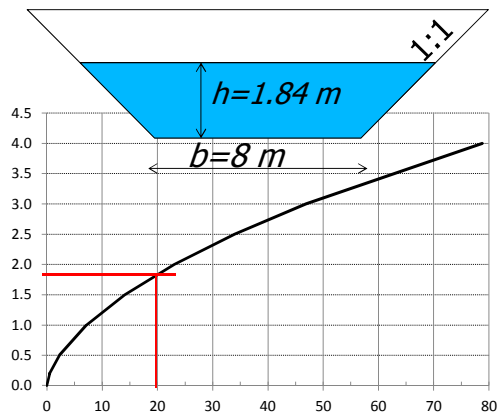
✓ nachylenie skarp $m = 1,0$

✓ spadek dna koryta: $i = 0,0005$

✓ współczynnik szorstkości powierzchni dna i ścian koryta: $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

$$Q = A \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$$

h [m]	U [m]	R [m]	v [m/s]	A [m ²]	Q [m ³ /s]
0.00	8.00	0.00	0.0	0.0	0.00
0.20	8.57	0.19	0.3	1.6	0.49
0.50	9.41	0.45	0.5	4.3	2.24
1.00	10.83	0.83	0.8	9.0	7.12
1.50	12.24	1.16	1.0	14.3	14.10
1.84	13.20	1.37	1.1	18.1	19.99
2.50	15.07	1.74	1.3	26.3	33.99
3.00	16.49	2.00	1.4	33.0	46.88
4.00	19.31	2.49	1.6	48.0	78.77



Narysować krzywą konsumcyjną, wyznaczyć napętnienie koryta h dla wydatku przepływu $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, obliczyć głębokość i prędkość krytyczną dla tego kanału.

Parametry ruchu krytycznego dla przepływu ustalonego w korycie pryzmatycznym: $Q = \text{const.}$

Dane:

✓ wydatek przepływu $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, przy napętnieniu koryta $h = 1,84 \text{ m}$ ($\alpha = 1.1$)

Równanie ruchu krytycznego:
$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A^3}{B} = \frac{1.1 \cdot 20^2}{9.81} = 44.85 \text{ m}^5$$

Aby wyznaczyć głębokość krytyczną dla powyższych warunków poszukujemy napętnienia h , dla którego:

$$\frac{A^3}{B_{\text{śr.}}} = 44.85 \text{ m}^5$$

h [cm]	$B_{\text{śr.}}$ [m]	A [m ²]	$A^3/B_{\text{śr.}}$ [m ⁵]
0.00	8.0	0.0	0.00
0.50	8.5	4.3	9.03
0.83	8.8	7.35	44.87
1.60	9.6	15.4	377.49
1.84	9.8	18.1	604.28
2.50	10.5	26.3	1722.66

$$h_{kr} = 0.83 \text{ m}$$

$$A = 0.5 \cdot h \cdot (b + B)$$

$$B_{\text{śr.}} = 0.5 \cdot (b + B)$$

$$B = b + 2 \cdot m \cdot h$$

$$V_{kr} = \frac{Q}{A} = \frac{20}{7.35} = 2.72 \text{ m/s}$$